



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

APROXIMACE VLEČNÝCH KŘIVEK

APPROXIMATION OF TURNING PATH BOUNDARIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Barbora Ondřejová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR HOLCNER, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Barbora Ondřejová
Název	Aproximace vlečných křivek
Vedoucí práce	doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Veselý, Kašpárek: Klotoida

TP 171 Vlečné křivky pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací

ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic

KA2 - Analýza dynamiky jízdy vozidel

Křivda, Vladislav. Analýza jízdy vozidel při průjezdu okružní křižovatkou s využitím software <http://kds.vsb.cz/krivda/di-vissim>

Manuály softwarových prostředků pro vlečné křivky

AASHTO Geometric Design of Highways and Streets

<http://design.transportation.org/Documents/TurnRadii,GreenBook2004.pdf>

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Proveďte rešerši předpisů a norem především z hlediska požadavků na pohyb modelového vozidla a na jeho geometrické charakteristiky. Pokuste se najít vztah mezi předpisy, doporučenými SW prostředky a reálným pohybem vozidla. Stanovte a jednoznačně popište postup výpočtu pro definovanou trajektorii. Navrhněte možné způsoby aproximace trajektorie modelového vozidla kružnicovými oblouky. Ověřte a doložte postupy výpočtu pro jednoduché vozidlo s dvěma nápravami a pro vozidlo se třemi nápravami a kloubem.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

V této bakalářské práci bude věnována pozornost požadavkům na pohyb modelového vozidla a na jeho geometrické charakteristiky. Budou zde stanoveny a popsány postupy výpočtu pro definovanou trajektorii směrodatného vozidla. Také zde budou navrženy možné způsoby aproximace trajektorie modelového vozidla kružnicovými oblouky.

KLÍČOVÁ SLOVA

vlečné křivky, směrodatné vozidlo, přechodnice, klotoida, aproximace

ABSTRACT

In this bachelor thesis, attention will be paid to the requirements for movement of the model vehicle and its geometric characteristics. Methods of calculation for the defined trajectory of a standard vehicle will be determined and described here, as well as possible ways of approximating the trajectory of the model vehicle using circular arcs.

KEYWORDS

turning path boundaries, design vehicle, spiral, clothoid, approximation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Barbora Ondřejová *Aproximace vlečných křivek*. Brno, 2017. 41 s. Bakalářská práce.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí
práce doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

Barbora Ondřejová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2017

Barbora Ondřejová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Holcnerovi, Ph.D. za poskytnuté rady při zpracovávání bakalářské práce. Velký dík patří i mé rodině a známým, kteří mě v průběhu mého studia podporovali.

OBSAH

1. ÚVOD.....	11
2. POJEM VLEČNÝCH KŘIVEK	12
2.1. Česká republika TP 171 Vlečné křivky pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací	12
2.2. USA American Association of State Highway and Transportation Officials [2], [3]	16
3. POČÍTAČOVÉ PROGRAMY	18
3.1. Autodesk Vehicle Tracking.....	18
3.2. AutoTURN	19
4. SMĚROVÉ ŘEŠENÍ KOMUNIKACE	20
4.1. Přechodnice	20
4.1.1. Průběh křivosti ve směrovém oblouku	21
4.1.2. Klotoida	22
4.1.2.1. Vytyčovací parametry klotoidy	22
4.1.2.2. Hlavní vytyčovací hodnoty klotoidy	22
5. APROXIMACE VLEČNÝCH KŘIVEK	26
5.1. Určení klotoidy pomocí hlavních vytyčovacích bodů	26
5.2. Aproximace klotoidy kružnicí.....	27
5.3. Aproximace pomocí okamžitého poloměru v polovině intervalu	28
5.4. Lineární aproximace	30
5.5. Porovnání	31
5.6. Postup výpočtu aproximace vlečných křivek.....	32
5.6.1. Vstupní hodnoty.....	32

5.6.2. Kroky výpočtu.....	33
6. ZÁVĚR	38
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	39
8. SEZNAM OBRÁZKŮ	40
9. SEZNAM TABULEK A GRAFŮ	41

1. ÚVOD

Problematikou vlečných křivek se v České republice zabývají technické podmínky TP 171 Vlečné křivky pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací z roku 2004, které vydalo Ministerstvo dopravy České republiky a zpracovalo Centrum dopravního výzkumu Brno.

Cílem bakalářské práce je poukázat na možné způsoby stanovení trajektorie směrodatného vozidla. Možné způsoby aproximace volantové křivky, kterou svým pohybem opisuje vozidlo ve směrovém oblouku, pomocí kružnicových oblouků. Porovnání výsledků se šablonami, které jsou předdefinovány pro směrodatná vozidla a různé způsoby jízdy v TP 171 Vlečné křivky pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací [1].

2. POJEM VLEČNÝCH KŘIVEK

Vozidlo, které jede přímým směrem potřebuje pro svůj průjezd takovou šířku komunikace odpovídající minimálně šířce samotného vozidla. Pokud však vozidlo vjíždí do oblouku, je potřebná šířka daleko větší. To se netýká pouze vozidel větších rozměrů, ale také například osobních automobilů.

Při průjezdu směrovým obloukem řidič svým stylem jízdy udává křivku, po které se pohybují přední kola motorového vozidla. Zadní kola se pohybují v závislosti na rozměrech motorového vozidla po křivce bližší vnitřní straně oblouku čímž vzniká charakteristické srpovité rozšíření plochy při průjezdu směrovým obloukem. Tuto plochu nazýváme vlečnou křivkou. Šířku vlečné křivky ovlivňuje poloměr směrového oblouku, středový úhel, konfigurace podvozku [1].

Vlečná křivka je plocha ohraničená obalovými křivkami, které vyplývají ze směrodatného vnějšího obrysu vozidla a polohy náprav. Vlečné křivky se využívají pro posouzení průjezdu směrodatného vozidla křižovatkami, parkovišti, kolem dopravních ostrůvků apod. Dále se vlečné křivky používají pro posouzení průjezdu a určení rozšíření ve směrových obloucích [6].

2.1. Česká republika TP 171 Vlečné křivky pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací

Vlečné křivky jsou ohraničeny tzv. obalovými křivkami, které jsou dány směrodatným obrysem vozidla a polohou náprav. Jejich tvar závisí i na předpokladu chování řidičů.

Znalost vlečných křivek určitého vozidla umožňuje provést hospodárný návrh na využití místa především v intravilánu, kde je místa nedostatek.

Při návrhu se využívá směrodatných vozidel, což jsou vozidla, která reprezentují aktuální a také očekávané složení vozového parku. Jsou volena tak, aby rozměry směrodatného vozidla nepřekračovalo 85 % vozidel příslušné skupiny [1].

Druh vozidla	Vnější rozměry						
	Délka	Rozvor	Převisy		Šířka	Výška	Obrysový poloměr zatačení vnější
			vpředu	vzadu			
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
Osobní automobil:	4,74 (4,34)	2,70	0,94	1,10	1,76 (1,68)	1,51	5,85 (5,65)
Nákladní automobil:							
Dodávka / obytný automobil	6,89	3,95	0,96	1,98	2,17	2,70	7,35
Malý nákladní (2 nápravy)	9,46	5,20	1,40	2,86	2,29	3,80	9,77
Velký nákladní (3 nápravy) ¹⁾	10,10	5,30 ¹⁾	1,48	3,32	2,50 ⁴⁾	3,80	10,05
Prívěsová souprava:	18,71						
Tažné vozidlo (3 nápravy) ¹⁾	9,70	5,287 ¹⁾	1,50	2,92	2,50 ⁴⁾	4,00	10,30
Prívěs (2 nápravy)	7,45	4,84	1,35 ³⁾	1,26	2,50	4,00	10,30
Návěsová souprava:	16,50						
Tažné vozidlo (2 nápravy)	6,08	3,80	1,43	0,85	2,50 ⁴⁾	4,00	7,90
Návěs (3 nápravy)	13,61	7,75	1,61	4,25	2,50	4,00	7,90
Autobusy:							
Dálkový a linkový autobus 12,00 m ⁷⁾	12,00	5,80	2,85	3,35	2,50 ⁴⁾	3,70 ⁶⁾	10,50
Dálkový a linkový autobus 13,70 m ²⁾	13,70	6,35 ²⁾	2,87	4,48	2,50 ⁴⁾	3,70 ⁶⁾	11,25
Dálkový a linkový autobus 15,00 m ²⁾	14,95	6,95 ²⁾	3,10	4,90	2,50 ⁴⁾	3,70 ⁶⁾	11,95
Kloubový autobus ⁷⁾	17,99	5,98/5,99	2,65	3,37	2,50 ⁴⁾	2,95	11,80
Vozidla pro odvoz odpadu:							
2 nápravy	9,03	4,60	1,35	3,08	2,50 ⁴⁾	3,55	9,40
3 nápravy	9,90	4,77 ¹⁾	1,53	3,60	2,50 ⁴⁾	3,55	10,25
3 nápravy ²⁾	9,95	3,90	1,35	4,70	2,50 ⁴⁾	3,55	8,60
Limity rozměrů podle vyhl. 341/2002 Sb.:							
Motorové vozidlo s výjimkou autobusu	12,00						
Prívěs	12,00						
Prívěsová souprava	18,75				2,55 ⁴⁾⁵⁾	4,00 ⁶⁾	12,50
Návěsová souprava	16,50						
Autobus	15,00						
Kloubový autobus dvoučlankový	18,00						

¹⁾ U třínápravových vozidel je zadní hnací dvounáprava sloučena do jedné střední nápravy

²⁾ U třínápravových vozidel s nepoháněnou třetí nápravou rozvor odpovídá hodnotě vzdálenosti mezi přední řídící nápravou a hnací nápravou

³⁾ Bez délky oje

⁴⁾ Bez vnějších zrcátek

⁵⁾ Nastavby chladiřských vozidel až 2,60 m

⁶⁾ V patrovém provedení 4,00 m

⁷⁾ Nízkopodlažní autobusy Karosa-Renault Citybus mají hodnoty rozvorů a převisů mírně odlišné, jízdní charakteristiky jsou však velmi podobné a šablony vlečných křivek v příloze pro tato vozidla rovněž použitelné

() Návrhové vozidlo osobní automobil s redukovánými rozměry

Obrázek 1: Geometrické charakteristiky směrodatných vozidel a zákonné maximální hodnoty [1]

V TP 171 [1] jsou obsaženy soubory šablon pro navrhování směrového řešení komunikace. Slouží především pro kontrolu průjezdnosti zaoblení rohů křižovatek a dopravních ostrůvků, vjezdů na pozemky, parkovišť, odpočívek, parkovacích garáží, ramp, obratišť, autobusových nádraží, zásobovacích dvorů apod.

Doposud používané šablony vlečných křivek jsou velmi zastaralé. Vycházejí z vozového parku, který byl aktuální v polovině 80. let. Od té doby došlo k mnohým změnám předpisů týkajících se stavby a vybavení vozidel. Jsou patrné změny složení vozového parku a zvětšují se maximální rozměry vozidel, ale také v současné době mají vozidla vyspělejší geometrii jízdy, takže si často vystačí se skromnějšími poměry na plochy pro jízdu než jejich předchůdci.

Pro konstrukci standardizovaných šablon vlečných křivek byly zvoleny dvě varianty, které představují dva rozdílné způsoby jízdy [1].

Způsob jízdy 1

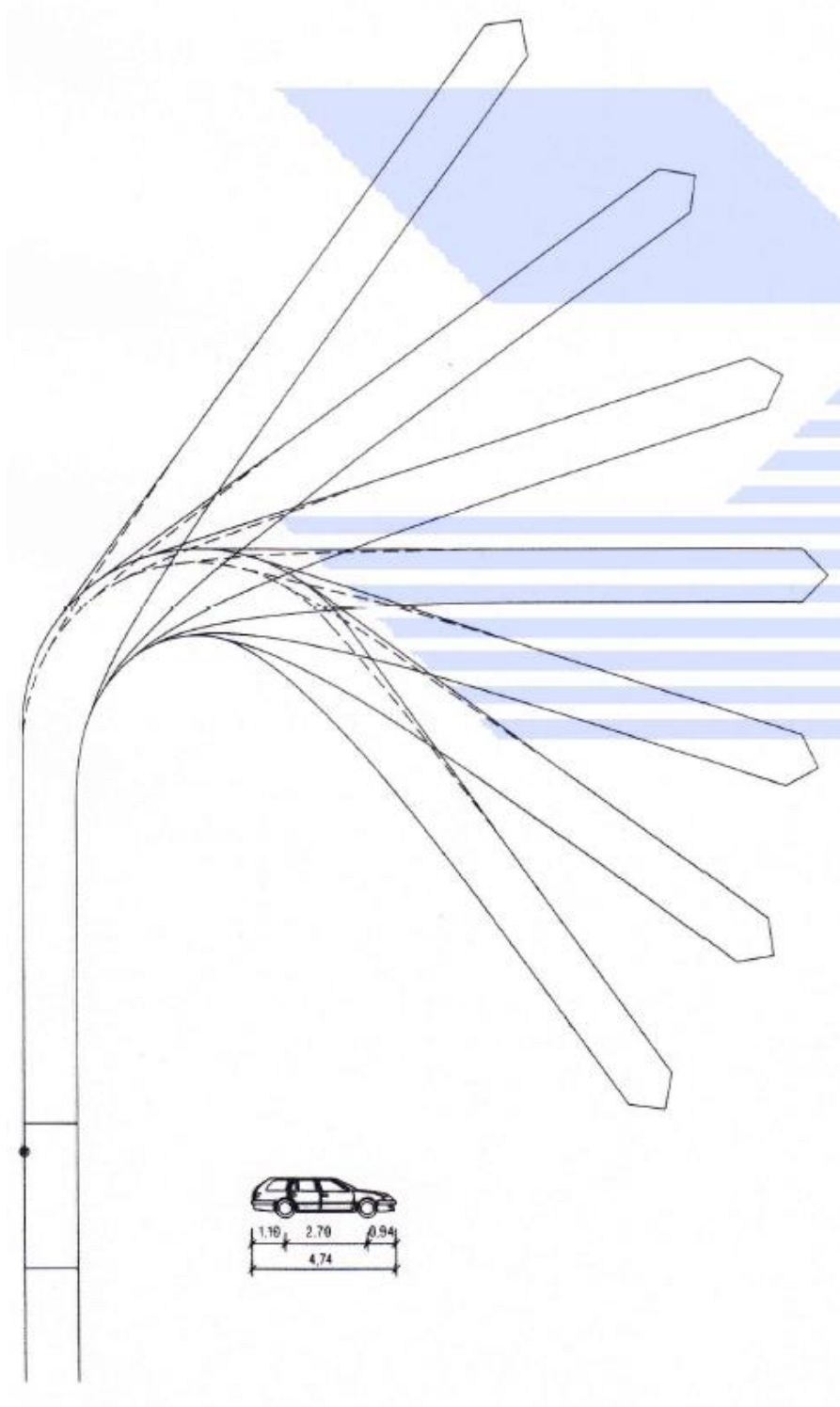
Ovládání řízení (natačení volantu) probíhá za jízdy malou rychlostí. Úseky vodících linií s kruhovými oblouky a přímkami se spojí tangenciálně, takže na místech přechodu nevzniká žádný zlom vodící linie. Takové zjednodušení je přípustné, neboť přechodnice je možné zanedbat díky rychlé změně úhlu řízení při jízdě malými rychlostmi.

Vnější poloměry odpovídají poloměrům zatáčení příslušného směrodatného vozidla. Řidiči vozidel plynule vjíždějí při stálém natačení volantu do kruhového oblouku a opouštějí ho rovněž při stálém natačení volantu.

Způsob jízdy 2

Jestliže řidiči vozidel natočí volant při (téměř) stojícím vozidle a potom se rozjedou, vzniká ve vodící linii zlom. Tento způsob jízdy s dosažením maximálního úhlu řízení při stojícím vozidle je simulován předpokladem náhlého přechodu mezi přímkou a kruhovým obloukem. Z toho vyplývá technicky možná změna úhlu směru okolo cca 40°, u autobusů (s výjimkou kloubových) 55°.

Při dimenzování částí pozemních komunikací se v zásadě vychází ze způsobu jízdy 1. Způsob jízdy 2 se považuje za výjimečný případ a neměl by být předpokládán u nových projektů (je vhodný např. při ověřování sjízdnosti stávajících zařízení novými směrodatnými vozidly, např. ověřování možnosti zásobování při změně ve vozovém parku) [1].



Obrázek 2: Šablona vlečných křivek pro osobní automobil [1]

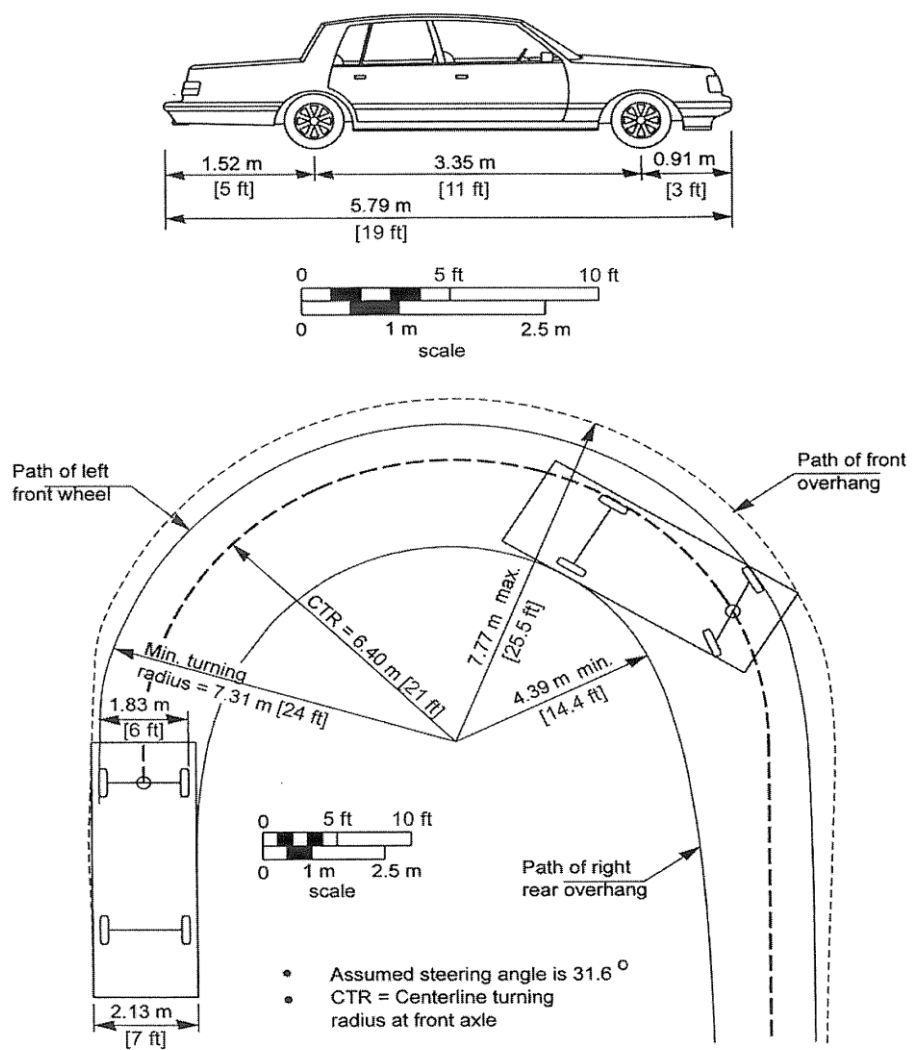
2.2. USA American Association of State Highway and Transportation Officials [2], [3]

V USA se při navrhování minimálních poloměrů při směrovém řešení vychází z AASHTO („American Association of State Highway and Transportation Officials“). Ve zdejší normě jsou definovány poloměry pro 19 typických designů amerických vozidel. Hlavními návrhovými hodnotami pro projektování jsou minimální středový poloměr, rozvor vozidla a dráha vnitřního zadního kola. Vliv řidiče (rychlost, při které vozidlo zatáčí) a smykové úhly kol jsou minimalizovány za předpokladu, že rychlost vozidla je menší než 15 km/h.

Vlečné křivky jsou ohraničeny křivkami, které opisuje vnější přední převis vozidla a dráha vnitřního zadního kola. Předpokládá se, že vnější přední kolo opisuje kruhový oblouk daný minimálním poloměrem zatáčení. Minimální poloměry zatáčení jsou stanoveny konstrukčními vlastnostmi vozidel.

Nákladní vozidla a autobusy obvykle potřebují více místa než osobní vozidla. To je dáno šířkou a rozvorem vozidel, z toho vyplývá i větší poloměry zatáčení, což jsou hlavní atributy pro návrh směrového řešení a příčné řezy komunikace.

Minimální poloměry zatáčení a délky přechodnic jsou v normě definovány pro vozidla jedoucí rychlostí menší než 15 km/h. Pro vyšší rychlosti jsou potřeba větší poloměry křivek a delší přechodové křivky.

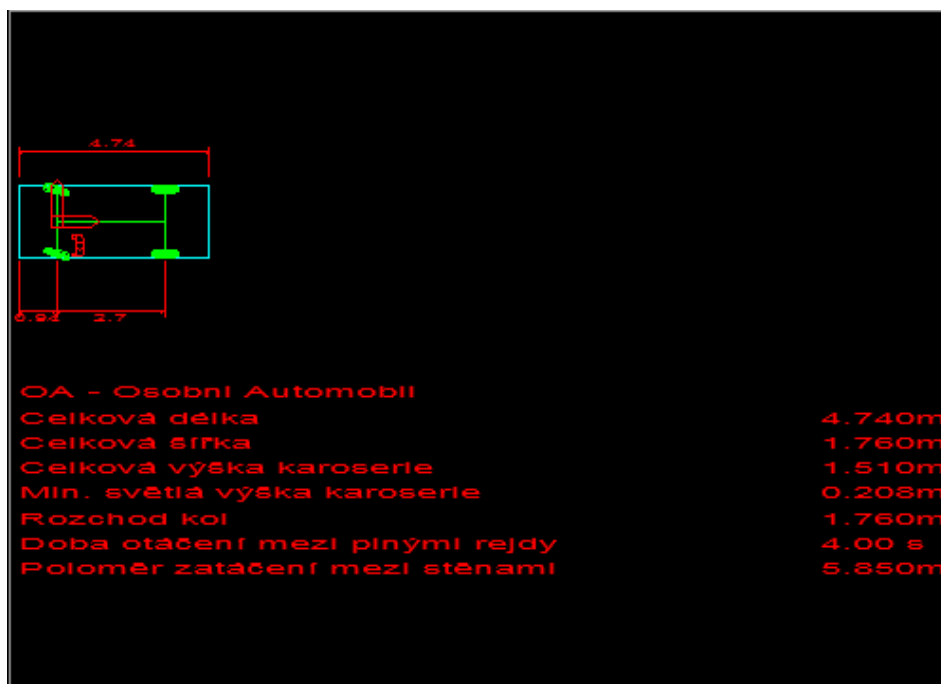


Obrázek 3: Šablona vlečných křivek pro osobní automobil [3]

3. POČÍTAČOVÉ PROGRAMY

3.1. Autodesk Vehicle Tracking

Autodesk Vehicle Tracking [10], [11] je software komplexní analýzy průjezdů dopravních prostředků (silničních a kolejových vozidel i letadel) a návrhů řešení pro analýzu dráhy vozidla pomocí průjezdových křivek vozidel křižovatek, okružních křižovatek a parkovišť ve 2D i ve 3D. Tento software umožňuje uživatelům vyhodnocovat pohyb vozidla na pozemní komunikaci pomocí knihovny dle TP 171 Vlečné křivky pro ověření průjezdnosti směrových povrchů pozemních komunikací.



Obrázek 4: Rozměry směrodatného vozidla

Autodesk Vehicle Tracking umožňuje analyzovat a simulovat vlečné křivky směrodatných vozidel dle TP 171 Vlečné křivky pro ověření průjezdnosti směrových povrchů pozemních komunikací.

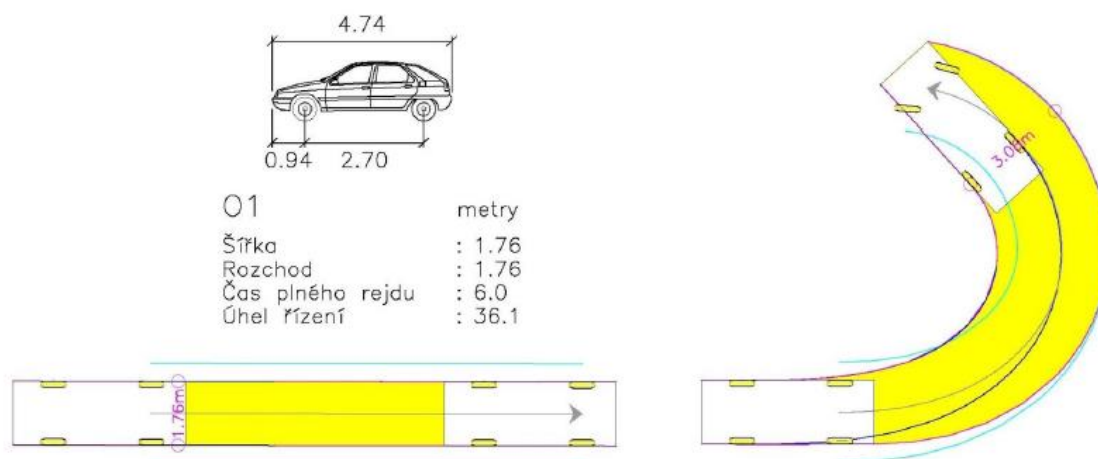
Při vytváření šablon pro směrodatná vozidla lze v programu dle návrhové rychlosti rozhodnout, zda se bude za návrhový považovat způsob jízdy 1 nebo 2. Do rychlosti

15 km/h zde zanedbávají dynamické účinky stejně jako v TP 171 při způsobu jízdy 1. Dále je v programu možné nastavit poloměry zatáčení jak předního, tak zadního kola dle předpokládaného stylu jízdy řidičů při navrhování směrového řešení komunikace.

3.2. AutoTURN

Nabízí řešení průjezdnosti vozidel a složitých dopravních situací v intravilánu a extravilánu s minimálním úsilím. Je určen pro dopravní a stavební inženýry, architekty a konstruktéry k vyhodnocení projektů s použitím normových nebo specializovaných vozidel pro všechny typy projektů silnic, dálnic a místních komunikací [7].

AutoTURN má obsáhlou databázi norem a směrnic pro tvorbu vlečných křivek pro jednotlivé státy. Pro Českou republiku TP 171 Vlečné křivky pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací i např. ČSN 73 6056 Odstavné a parkovací plochy silničních vozidel. Pomocí nástrojů pro tvorbu a vykreslení vlečných křivek vozidla zde lze simulovat pohyb vozidel ve stísněných prostorech.



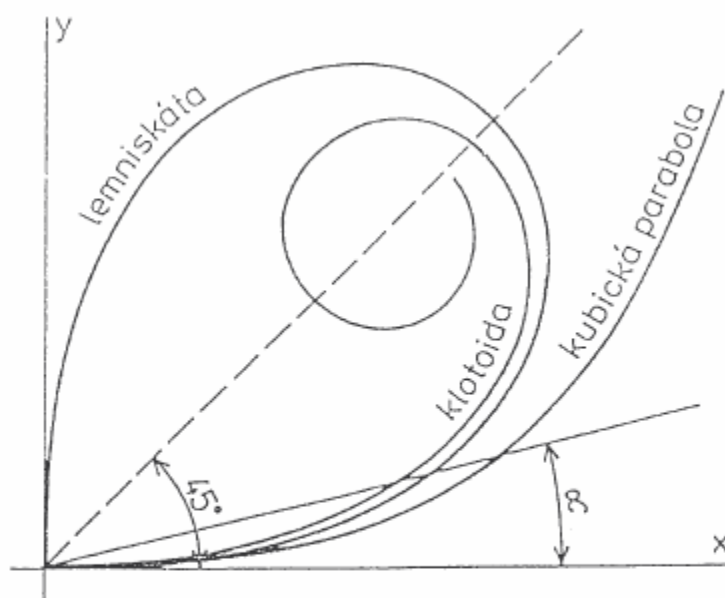
Obrázek 5: Porovnání přímého a odbočovacího manévru osobního vozidla v programu AutoTURN [7]

4. SMĚROVÉ ŘEŠENÍ KOMUNIKACE

Osa silnice nebo dálnice se vede v přímém úseku nebo v obloucích tak, aby trasa působila plynulým dojmem a těleso komunikace bylo co nejdokonaleji včleněno do krajiny. Dlouhé přímé úseky trasy nejsou vhodné, protože vytvářejí nepříznivé jízdní podmínky (jednotvárná jízda snižující pozornost řidičů, oslňování, zvyšování jízdní rychlosti). Pro směrové řešení dvoupruhových silnic je vhodné navrhnout přímky v délce zajišťující rozhled pro předjíždění a omezovat délky směrových oblouků, protože jsou z hlediska rozhledu méně příznivé.

4.1. Přechodnice

Při směrovém řešení trasy se využívá poloměr směrového oblouku a při tomhle předpokladu si většina lidí představí, že oblouk automaticky znamená kružnici. Součástí každého oblouku je i přechodnice neboli křivka, která plynule mění svou křivost a v místě napojení na jiné směrové prvky (kružnice nebo přímka) má křivost stejnou jako napojované prvky. Pouze kružnicový oblouk se také vyskytuje, ale pro směrové řešení se toto směrové řešení dle normy nedoporučuje [6].



Obrázek 6: Nejpoužívanější přechodnicové křivky [6]

Nejčastěji se jako přechodnice využívá křivka zvaná klotoida. Další křivky, které se také dají využívat jako přechodnice jsou:

- lemniskáta
- kubická parabola (často se využívá v železničním stavitelství)
- kvadratická parabola (je použitelná pro vytvoření oblouku pouhým pásmem nebo primitivním měřítkem v podobě provazu, není to však oblouk normový a přechodnice nemá v místě dotyku nulovou křivost)
- parabola čtvrtého stupně
- sinusoida (nulová křivost je v inflexním bodě sinusoidy)
- Schrammova křivka

4.1.1.Průběh křivosti ve směrovém oblouku

Křivost je definována jako inverzní hodnota k poloměru křivosti. Udává velikost zakřivení křivky v bodě.

$$\rho = \frac{1}{R}$$

V rovině existují dvě křivky, jejichž křivost je konstantní – kružnice ($\rho=1/R$) a přímka ($\rho=0$). Pro přímku platí $R \rightarrow \infty$.

GRAF KŘIVOSTI



Obrázek 7: Graf křivosti čistě kružnicového oblouku [9]

Podle daného grafu křivosti je vidět, že toto není ideální návrh směrového řešení v oblouku. Pokud by se řidič snažil dodržovat trajektorii přímka-kružnice-přímka, musel by při konstantní nenulové rychlosti změnit poloměr dráhy (otočit volantem do konečné polohy) za nulový čas v místě skokové změny křivosti. Další variantou by bylo zastavit vozidlo v bodě dotyku, změnit požadovaný poloměr a pokračovat v jízdě. Ani jedna z variant není z hlediska bezpečného provozu vhodná.

Ideálním řešením tohoto problému je použít kružnicový oblouk s přechodnicí. Začátek klotoidy má nulovou křivost.

4.1.2. Klotoida

Použití přechodnice umožňuje pro silniční vozidla návrh směrového řešení podobný realistické trajektorii. Při návrhu pozemních komunikací se jako přechodnice nejčastěji využívá klotoida, která má lineární závislost křivosti na délce přechodnice [4].

Proti čistě kružnicovému oblouku má oblouk s klotoidickými přechodnicemi příznivější průběh a trajektorie se s ním může shodovat s dostatečnou přesností [6].

GRAF KŘIVOSTI



Obrázek 8: Graf křivosti s klotoidickými přechodnicemi [9]

Zeleně je zde vyznačena volantová křivka, což je název pro skutečnou trajektorii vozidla. Matematicky není nijak definována a každý řidič ji způsobem své jízdy vykreslí jinak.

4.1.2.1. Vytyčovací parametry klotoidy

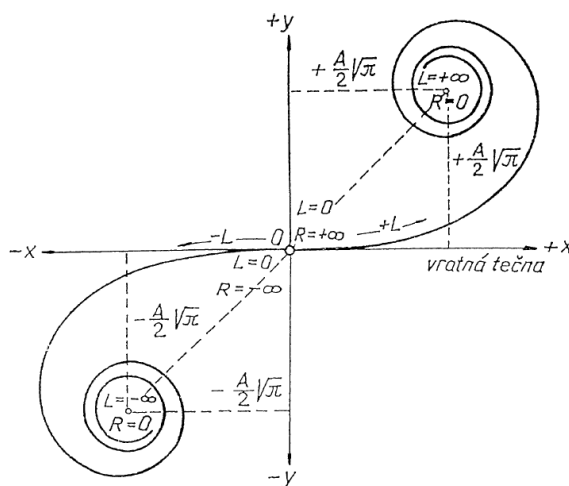
Klotoida je definována základní rovnicí klotoidy:

$$L * R = \text{konst.}$$

Základní rovnice klotoidy se nejčastěji píše ve tvaru

$$A^2 = L * R ,$$

kde se jako konstanta volí druhá mocnina parametru A. Tímto způsobem je pro všechny hodnoty parametru A jednoznačně definována křivka, která je nekonečně dlouhá a má tvar spirály, která se zavíjí sama do sebe.



Obrázek 9: Klotoida [4]

Při návrhu přechodnic se ale využívá kratšího úseku od bodu 0, kde se přechodnice napojuje na přímou část, až k místu, kde je R shodné s poloměrem kružnicového oblouku, na který přechodnici napojujeme.

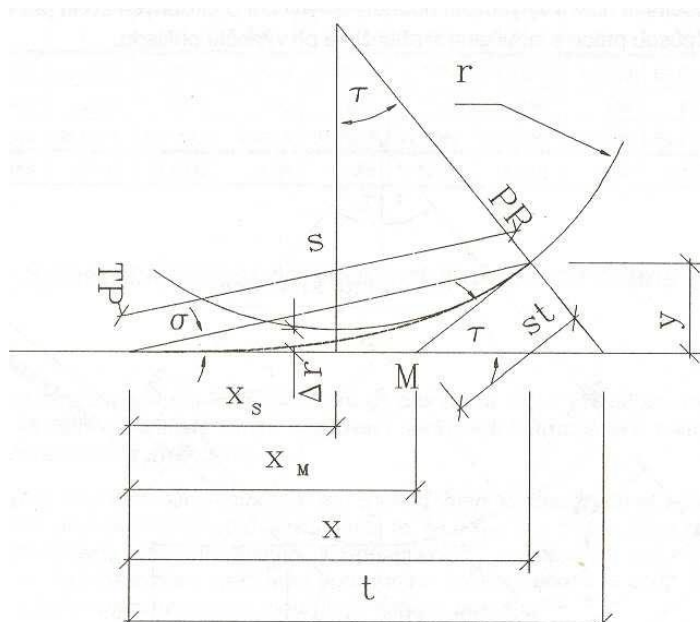
Pro parametr A platí, čím je menší, tím rychleji se zmenšuje poloměr křivosti. Z toho vyplývá, že parametr určuje tvar klotoidy a je pro ni tím, čím je poloměr pro kružnicový oblouk.

Další základní charakteristikou klotoidy je těčný úhel τ . Jedná se o úhel v obloukových jednotkách neboli radiánech a je definován jako úhel, který svírají tečny klotoidy v počátečním a koncovém bodě.

$$\tau = \frac{l}{2R} = \frac{l^2}{2A^2} = \frac{A^2}{2R^2}$$

Doposud uvedené charakteristiky klotoidy umožňují přímý výpočet hlavních vytyčovacích hodnot. Dalšími hlavními vytyčovacími hodnotami jsou:

- x, y – pravoúhlé souřadnice koncového bodu
- x_s – poloha paty kolmice spuštěné ze středu oskulační kružnice na hlavní tečnu
- x_M – poloha průsečíku koncové tečny s hlavní tečnou
- s_t – délka koncové tečny
- ΔR – odsun oskulační kružnice od hlavní tečny
- z – vzepětí, vzdálenost průsečíku tečen od vrcholu oblouku



Obrázek 10: Vytyčení klotoidy [4]

4.1.2.2. Hlavní vytyčovací hodnoty klotoidy

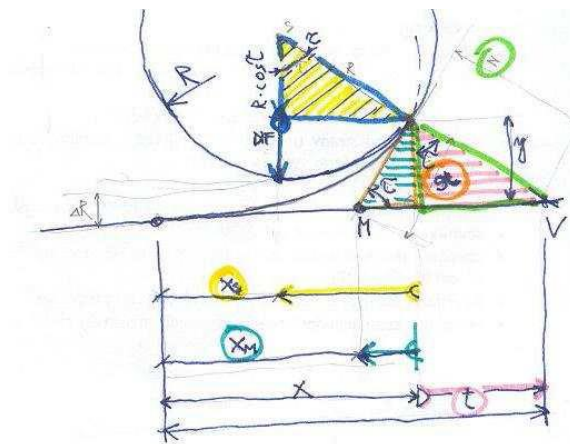
Podstatou výpočtu hlavních vytyčovacích hodnot je výpočet souřadnic x, y koncového bodu. Základními hodnotami jsou libovolné dvě ze základních charakteristik umožňujících přímý výpočet. Souřadnice koncového bodu můžeme určit s předem zvolenou přesností (neexistuje přesný analytický vztah) jako součet několika členů nekonečné matematické řady [4].

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} L * (-1)^{n+1} * \frac{\tau^{2n-2}}{(4n-3) * (2n-2)!}$$

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} L * (-1)^{n+1} * \frac{\tau^{2n-1}}{(4n-1) * (2n-1)!}$$

Úhel τ se dosazuje v radiánech. Pro běžné výpočty stačí první tři členy řady.

Další vytyčovací hodnoty se ze souřadnic koncového bodu dají snadno dopočítat pomocí goniometrických funkcí.



Obrázek 11: Hlavní vytyčovací hodnoty [9]

5. APROXIMACE VLEČNÝCH KŘIVEK

Pro vykreslení klotoidy potřebujeme několik základních hodnot. Pro účely bakalářské práce jsou známými hodnotami jsou výpočetní krok (0,1 metru), poloměr R kružnicové části oblouku (60 metrů), délka kružnicové části (65 metrů) a délka přechodnice (40 metrů).

5.1. Určení klotoidy pomocí hlavních vytyčovacích bodů

Pro určení parametru A využijeme vzorce $A^2 = L * R$, do kterého když dosadíme vstupní hodnoty nám vyjde 2400 m^2 . Při výpočtu tečného úhlu τ , dle vzorce

$$\tau = \frac{l}{2R} = \frac{l^2}{2A^2} = \frac{A^2}{2R^2}$$

jako l nedosazujeme délku přechodnice, ale vzdálenost od začátku. l do vztahů

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} l * (-1)^{n+1} * \frac{\tau^{2n-2}}{(4n-3) * (2n-2)!}$$

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} l * (-1)^{n+1} * \frac{\tau^{2n-1}}{(4n-1) * (2n-1)!}$$

dosazujeme l jako vzdálenost od počátku.

V případě ručního výpočtu bylo počítáno pro prvních 7 členů nekonečné matematické řady. Pro ještě větší přesnost výpočtu by bylo možné přidat několik dalších členů nekonečné matematické řady. Ale dle základních předpokladů a vykreslení se výsledná klotoida dá považovat za přesnou.

vzdálenost od začátku [m]	koncový úhel τ [rad]	souřadnice x [m]	souřadnice y [m]	poloměr kružnice R [m]
0,0	0,00000	0,000000	0,000000	60
0,1	0,00000	0,100000	0,000000	délka přechodnice L [m]
0,2	0,00001	0,200000	0,000001	40
0,3	0,00002	0,300000	0,000002	výpočetní krok [m]
0,4	0,00003	0,400000	0,000004	0,1
0,5	0,00005	0,500000	0,000009	
0,6	0,00008	0,600000	0,000015	
0,7	0,00010	0,700000	0,000024	
0,8	0,00013	0,800000	0,000036	
0,9	0,00017	0,900000	0,000051	
1,0	0,00021	1,000000	0,000069	
1,1	0,00025	1,100000	0,000092	
1,2	0,00030	1,200000	0,000120	
1,3	0,00035	1,300000	0,000153	
1,4	0,00041	1,400000	0,000191	
1,5	0,00047	1,500000	0,000234	

Tabulka 1: Hlavní vytyčovací hodnoty

5.2. Aproximace klotoidy kružnicí

Pro jednodušší výpočet a popis volantové křivky lze využít aproximaci klotoidy kružnicí. Existuje několik způsobů aproximace. V tomhle případě je poloměr vždy určený na konci počítaného úseku z délky křivky a odpovídajícího koncového úhlu. Při výpočtu souřadnic se zde využívají pouze základní goniometrické funkce.

$$x_{i+1} = x_i + R_{i+1} * (\sin \tau_{i+1} - \sin \tau_i)$$

$$y_{i+1} = y_i + R_{i+1} * (\cos \tau_i - \cos \tau_{i+1})$$

τ se zde vypočítá stejným způsobem jako u výpočtu klotoidy v předchozím případě. R_i , R_{i+1} jsou okamžité poloměry kružnic, které se vypočítají ze vztahu

$$R = \frac{l}{2\tau}$$

vzdálenost od začátku [m]	τ [rad]	souřadnice x [m]	souřadnice y [m]	okamžitý poloměr R [m]
0,0	0,00000	0,000000	0,000000	
0,1	0,00000	0,050000	0,000000	24000,00
0,2	0,00001	0,125000	0,000000	12000,00
0,3	0,00002	0,208333	0,000002	8000,00
0,4	0,00003	0,295833	0,000004	6000,00
0,5	0,00005	0,385833	0,000008	4800,00
0,6	0,00008	0,477500	0,000014	4000,00
0,7	0,00010	0,570357	0,000022	3428,57
0,8	0,00013	0,664107	0,000033	3000,00
0,9	0,00017	0,758552	0,000047	2666,67
1,0	0,00021	0,853552	0,000065	2400,00
1,1	0,00025	0,949006	0,000087	2181,82
1,2	0,00030	1,044839	0,000113	2000,00
1,3	0,00035	1,140993	0,000145	1846,15
1,4	0,00041	1,237422	0,000181	1714,29
1,5	0,00047	1,334089	0,000224	1600,00

výpočetní krok [m]
0,1

Tabulka 2: Hodnoty aproximace klotoidy kružnicí

5.3. Aproximace pomocí okamžitého poloměru v polovině intervalu

Třetí varianta používá křivost spočítanou pro polovinu právě počítaného úseku. Dá se považovat jako průměrná křivost v daném intervalu.

Při výpočtu souřadnic zde hraje velkou roli lineární změna křivosti klotoidy.

$$\Delta\rho = \frac{1}{R * n}$$

R je poloměr směrového oblouku

n je počet kroků na přechodnici, určí se jako $\frac{\text{délka přechodnice}}{\text{výpočetní krok}}$

Okamžitý poloměr je inverzní ke křivosti v polovině intervalu.

$$R = \frac{1}{\rho}$$

I v tomto případě se souřadnice x, y vypočítají dle vztahu

$$x_{i+1} = x_i + R_{i+1} * (\sin \tau_{i+1} - \sin \tau_i)$$

$$y_{i+1} = y_i + R_{i+1} * (\cos \tau_i - \cos \tau_{i+1})$$

vzdálenost od začátku [m]	τ [rad]	souřadnice x [m]	souřadnice y [m]	okamžitý poloměr R z křivosti v polovině intervalu [m]	křivost v polovině intervalu [m ⁻¹]	poloměr kružnice R [m]
0,0	0,00000	0,000000	0,000000	48000,0000000	0,0000208	60
0,1	0,00000	0,100000	0,000000	16000,0000000	0,0000625	délka přechodnice L [m]
0,2	0,00001	0,200000	0,000001	9600,0000000	0,0001042	40
0,3	0,00002	0,300000	0,000002	6857,1428571	0,0001458	výpočetní krok [m]
0,4	0,00003	0,400000	0,000005	5333,3333333	0,0001875	0,1
0,5	0,00005	0,500000	0,000009	4363,6363636	0,0002292	změna křivosti [m ⁻¹]
0,6	0,00008	0,600000	0,000015	3692,3076923	0,0002708	0,0000417
0,7	0,00010	0,700000	0,000024	3200,0000000	0,0003125	
0,8	0,00013	0,800000	0,000036	2823,5294118	0,0003542	
0,9	0,00017	0,900000	0,000051	2526,3157895	0,0003958	
1,0	0,00021	1,000000	0,000070	2285,7142857	0,0004375	
1,1	0,00025	1,100000	0,000093	2086,9565217	0,0004792	
1,2	0,00030	1,200000	0,000120	1920,0000000	0,0005208	
1,3	0,00035	1,300000	0,000153	1777,7777778	0,0005625	
1,4	0,00041	1,400000	0,000191	1655,1724138	0,0006042	
1,5	0,00047	1,500000	0,000235	1548,3870968	0,0006458	

Tabulka 3: Aproximace pomocí okamžitého poloměru v polovině intervalu

5.4. Lineární aproximace

V případě lineární aproximace jde především o nahrazení klotoidy přímkou, polynomem prvního stupně.

Při této aproximaci se počítá se změnou úhlu

$$\Delta\tau = \frac{l^2}{A^2}$$

Souřadnice x, y bodů aproximované klotoidy se pak vypočítají ze vztahů

$$x_{i+1} = x_i + \cos \tau_{i+1}$$

$$y_{i+1} = y_i + \sin \tau_{i+1}$$

vzdálenost od začátku [m]	τ [rad]	souřadnice x [m]	souřadnice y [m]
0,0	0,00000	0,000000	0,000000
0,1	0,00000	0,100000	0,000000
0,2	0,00001	0,200000	0,000002
0,3	0,00003	0,300000	0,000004
0,4	0,00004	0,400000	0,000008
0,5	0,00006	0,500000	0,000015
0,6	0,00009	0,600000	0,000023
0,7	0,00012	0,700000	0,000035
0,8	0,00015	0,800000	0,000050
0,9	0,00019	0,900000	0,000069
1,0	0,00023	1,000000	0,000092
1,1	0,00028	1,100000	0,000119
1,2	0,00033	1,200000	0,000152
1,3	0,00038	1,300000	0,000190
1,4	0,00044	1,400000	0,000233
1,5	0,00050	1,500000	0,000283

$\Delta\tau$ [rad]
0,000004
výpočetní krok l [m]
0,1

Tabulka 4: Lineární aproximace

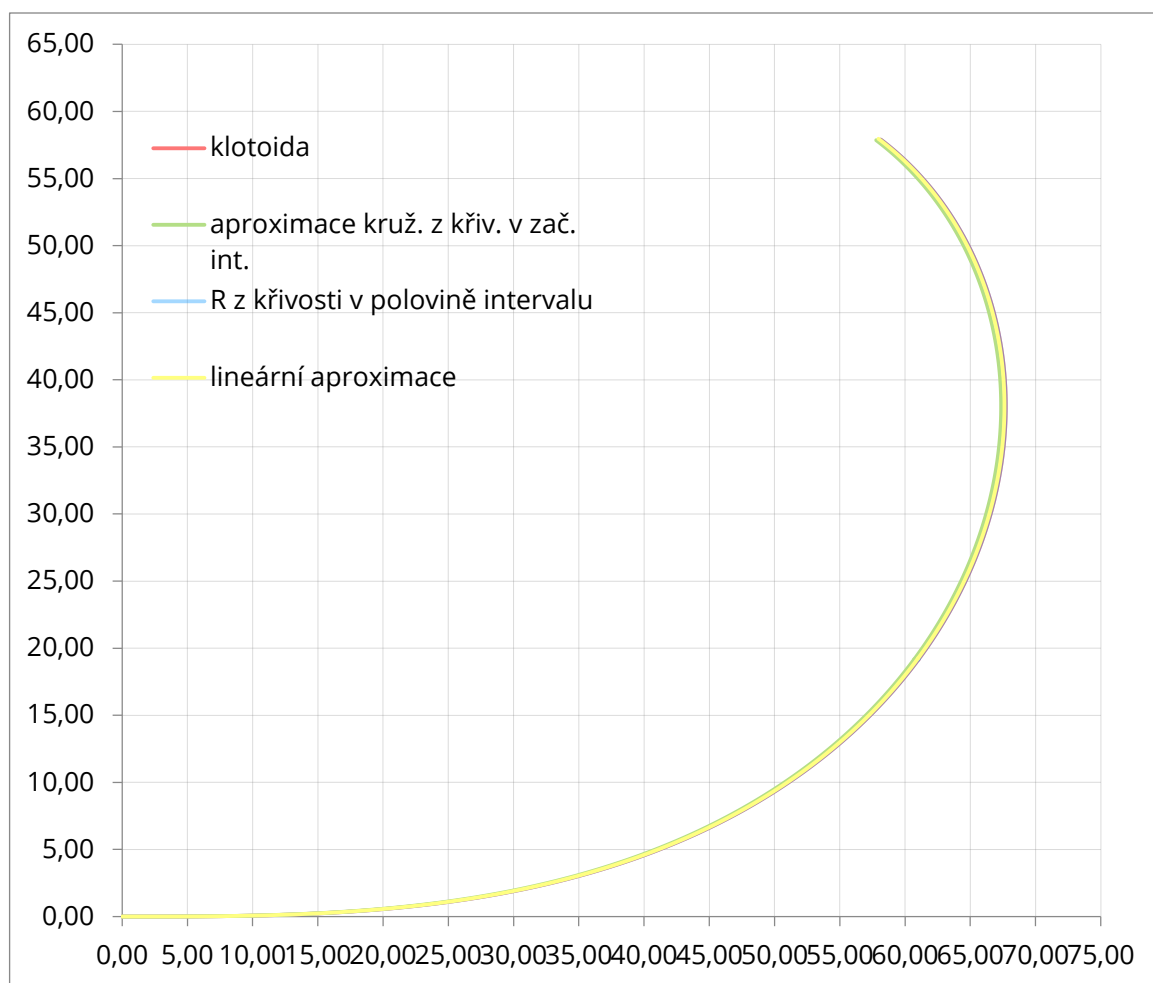
5.5. Porovnání

Tabulka obsahuje konečné hodnoty pro klotoidu délky 100 metrů. Na hodnotách je vidět, že přesnému výpočtu souřadnic klotoidy se blíží aproximace pomocí kružnice, ve které se okamžitý poloměr určuje z křivosti v polovině intervalu.

	klotoida	aproximace kružnicí	poloměr z křivosti	lineární aproximace
koncový úhel	0,783382	0,786006	0,783383	0,785448
rozdíl v koncovém úhlu	0,00	-0,002623	0,000000	-0,002066
odchylka x	0,00	-0,348637	-0,000037	-0,180648
odchylka y	0,00	-0,044441	0,000018	0,059075
odchylka	0,00	0,351458	0,000041	0,190062

Tabulka 5: Porovnání koncových hodnot klotoidy

Příklad aproximace kružnicí, ve které se poloměr určuje na konci počítaného úseku z délky křivky a odpovídajícího koncového úhlu. Jedná se o poměrně nepřesný postup, ve kterém je zvolený špatný předpoklad tvaru grafu křivosti klotoidy. I když ani tímhle způsobem odchylka od skutečného tvaru klotoidy není až tak drastická. Při návrhu klotoidy délky 100 metrů vzniká odchylka 0,35 metru.



Graf 1: Porovnání klotoid dle různých aproximací

5.6. Postup výpočtu aproximace vlečných křivek

5.6.1. Vstupní hodnoty

Při známých rozměrech směrodatného vozidla lze provést výpočty pro ověření průjezdnosti směrového oblouku. Pomocí aproximací volantové křivky vozidla na jednodušší geometrické tvary jako jsou přímka, klotoida, kružnice. Při svém návrhu jsem si ještě i klotoidu approximovala pomocí kružnic s okamžitým poloměrem zjištěným z křivosti v polovině intervalu.

Znamé parametry jsou rozměry vozidla, pro účely bakalářské práce směrodatné osobní vozidlo z TP 171.

ROZMĚRY VOZIDLA			
rozvor	šířka	převis vepředu	převis vzadu
2,70	1,76	0,94	1,10

Tabulka 6: Rozměry vozidla

Dalšími známými hodnotami jsou výpočetní krok (v případě bakalářské práce 0,1 metru), poloměr R kružnicové části oblouku (60 metrů), délka kružnicové části (65 metrů) a délka přechodnice (40 metrů). Jedná se o oblouk se symetrickými přechodnicemi.

5.6.2. Kroky výpočtu

- **Výpočet křivosti** podle rovnice

$$\rho = \frac{1}{R}$$

Pro přímou část trajektorie je křivost rovna 0 a pro oblouk má křivost konstantní hodnotu $1/R$, což je v daném případě $0,1666 \text{ m}^{-1}$. Pro přechodnici se křivost lineárně mění podle vzorce

$$\rho_{i+1} = \rho_i + \rho_{\text{mezi}} + \Delta\rho$$

kde ρ_{mezi} je křivost v polovině intervalu

$\Delta\rho$ je změna křivosti podle

$$\Delta\rho = \frac{1}{R * n} = 4,16667 * 10^{-5}$$

- **Okamžitý poloměr klotoidy** určíme ze vztahu inverzního ke křivosti klotoidy

$$R = \frac{1}{\rho}$$

Pro přímku má poloměr hodnotu ∞ a pro kružnici jsme si ho zvolili na začátku navrhování jako 60 metrů.

- **Úhlový krok δ** závisí na tom, zda jde o přímku nebo jinou křivku. Pro přímku je roven 0, pro klotoidu a kružnici se vypočítá jako

$$\delta = \frac{l}{R}$$

kde l je výpočetní krok

R je okamžitý poloměr

Pro kružnici má konstantní hodnotu rovnu 0,001667 rad.

- **Úhel vozidla α** se vypočítá

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \delta_{i+1}$$

- **Odsun oskulační kružnice ΔR**

$$\Delta R = \sqrt{R^2 + r^2} - R$$

kde R je okamžitý poloměr

r je rozvor návrhového vozidla (v našem případě 2,70 metru).

- **Pravá strana souřadnice kol automobilu**

- **Zadní kolo**

pro přímku
$$x_{i+1} = l * \cos \alpha_i + x_i$$

$$y_{i+1} = l * \sin \alpha_i + y_i$$

pro klotoidu a kružnici
$$x_{i+1} = x_i + R_{i+1} * (\sin \alpha_{i+1} - \sin \alpha_i)$$

$$y_{i+1} = y_i + R_{i+1} * (\cos \alpha_i - \cos \alpha_{i+1})$$

Sinus a cosinus závisí na orientaci kladných hodnot.

- **Přední kolo**
$$x_i = x_1 + r * \cos \alpha_i$$

$$y_i = y_1 + r * \sin \alpha_i$$

- **Levá strana souřadnice kol automobilu**

- **Zadní kolo**

pro přímku $x_{i+1}''' = l * \cos \alpha_i + \ddot{x}_i$

$$y_{i+1}''' = l * \sin \alpha_i + \ddot{y}_i$$

pro klotoidu a kružnici $x_{i+1}''' = \ddot{x}_i + (R_{i+1} - r) * (\sin \alpha_{i+1} - \sin \alpha_i)$

$$y_{i+1}''' = \ddot{y}_i + (R_{i+1} - r) * (\cos \alpha_i - \cos \alpha_{i+1})$$

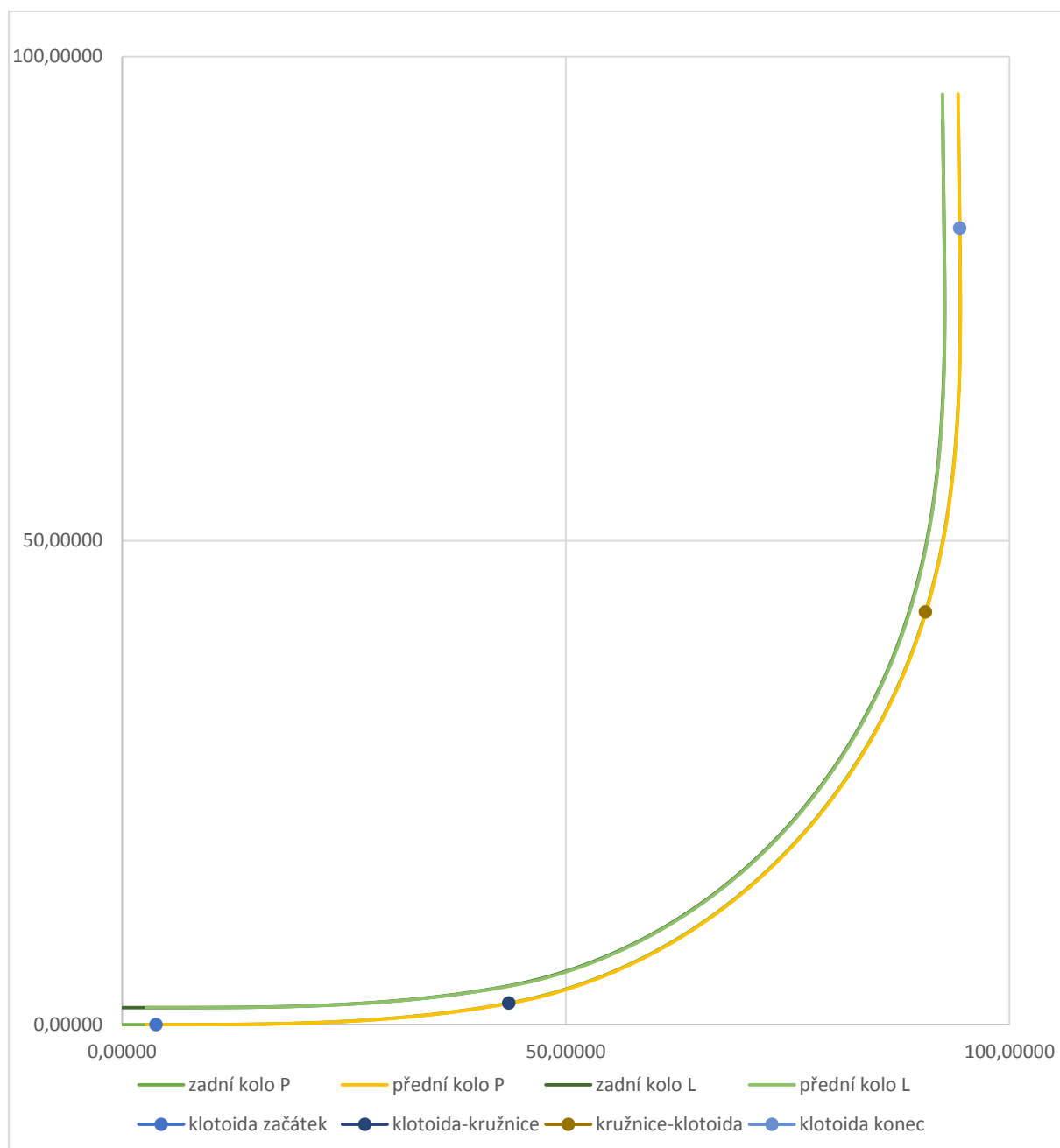
Sinus a cosinus závisí na orientaci kladných hodnot.

- **Přední kolo** $x_i = \ddot{x}_i + r * \cos \alpha_i$

$$y_i = \ddot{y}_i + r * \sin \alpha_i$$

							PRÁVÁ STRANA				LEVÁ STRANA			
vzdálenost od začátku [m]	okamžitý poloměr [m]	druh křivky	křivost [m ⁻¹]	úhel vozidla α[rad]	úhlový krok δ [rad]	ΔR	zadní kolo: souřadnice x [m]	zadní kolo: souřadnice y [m]	přední kolo: souřadnice x [m]	přední kolo: souřadnice y [m]	zadní kolo: souřadnice x [m]	zadní kolo: souřadnice y [m]	přední kolo: souřadnice x [m]	přední kolo: souřadnice y [m]
108,60	60,00	kružnice	0,0167	1,249583	0,001667	0,061	90,49180	42,43920	91,34424	45,00110	88,82182	42,99486	89,67425	45,55677
108,70	60,00	kružnice	0,0167	1,251250	0,001667	0,061	90,52329	42,53411	91,37146	45,09743	88,85239	43,08699	89,70055	45,65031
108,80	60,15	klotoida	0,0166	1,252913	0,001663	0,061	90,55463	42,62908	91,39853	45,19380	88,88280	43,17918	89,72671	45,74390
108,90	60,30	klotoida	0,0166	1,254571	0,001658	0,060	90,58580	42,72409	91,42545	45,29021	88,91307	43,27142	89,75272	45,83754
109,00	60,45	klotoida	0,0165	1,256225	0,001654	0,060	90,61682	42,81916	91,45223	45,38667	88,94319	43,36372	89,77859	45,93123
109,10	60,61	klotoida	0,0165	1,257875	0,001650	0,060	90,64768	42,91428	91,47885	45,48316	88,97315	43,45607	89,80432	46,02496
109,20	60,76	klotoida	0,0165	1,259521	0,001646	0,060	90,67839	43,00945	91,50533	45,57969	89,00297	43,54849	89,82991	46,11874
109,30	60,91	klotoida	0,0164	1,261163	0,001642	0,060	90,70894	43,10467	91,53166	45,67627	89,03264	43,64096	89,85535	46,21256
109,40	61,07	klotoida	0,0164	1,262800	0,001638	0,060	90,73933	43,19994	91,55784	45,77288	89,06215	43,73348	89,88066	46,30642
109,50	61,22	klotoida	0,0163	1,264433	0,001633	0,060	90,76957	43,29525	91,58387	45,86953	89,09152	43,82606	89,90582	46,40034
109,60	61,38	klotoida	0,0163	1,266063	0,001629	0,059	90,79965	43,39062	91,60976	45,96623	89,12074	43,91869	89,93085	46,49429
109,70	61,54	klotoida	0,0163	1,267688	0,001625	0,059	90,82958	43,48604	91,63550	46,06296	89,14981	44,01138	89,95573	46,58830
109,80	61,70	klotoida	0,0162	1,269308	0,001621	0,059	90,85935	43,58150	91,66109	46,15972	89,17873	44,10412	89,98047	46,68234
109,90	61,86	klotoida	0,0162	1,270925	0,001617	0,059	90,88897	43,67702	91,68654	46,25653	89,20751	44,19692	90,00508	46,77643
110,00	62,02	klotoida	0,0161	1,272538	0,001613	0,059	90,91843	43,77258	91,71184	46,35337	89,23613	44,28977	90,02955	46,87056
110,10	62,18	klotoida	0,0161	1,274146	0,001608	0,059	90,94774	43,86819	91,73700	46,45025	89,26461	44,38267	90,05387	46,96474
110,20	62,34	klotoida	0,0160	1,275750	0,001604	0,058	90,97689	43,96384	91,76201	46,54717	89,29294	44,47562	90,07806	47,05895
110,30	62,50	klotoida	0,0160	1,277350	0,001600	0,058	91,00589	44,05955	91,78688	46,64413	89,32113	44,56863	90,10211	47,15321

Tabulka 7: Část tabulky pro výpočet aproximací vlečných křivek



Graf 2: Vykreslení vlečných křivek

6. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo poukázat na možné způsoby stanovení trajektorie směrodatného vozidla. Pro tvorbu zde byly využity, jak softwarové programy především Autodesk Vehicle Tracking, tak zde byl ukázaný i ruční výpočet pomocí aproximace volantové křivky. Aproximace klotoidy zde byly porovnány s přesným výpočtem hlavních vytyčovacích prvků klotoidy.

Výsledné vykreslení výpočtu v grafu bylo porovnáno se šablonami, které jsou předdefinovány pro směrodatná vozidla a různé způsoby jízdy v TP 171 Vlečné křivky pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací. Svým tvarem si vzájemně odpovídají. Při výpočtu bylo využito zjednodušení pomocí kružnicových oblouků pro lepší představu.

Pro kontrolu průjezdnosti obloukem se využívá TP 171, které bylo vydáno v roce 2004, ale šablony vlečných křivek jsou velmi zastaralé. Vycházejí z vozového parku, který byl aktuální v polovině 80. let. Od té doby došlo k mnohým změnám předpisů týkajících se stavby a vybavení vozidel. Jsou patrné změny složení vozového parku a zvětšují se maximální rozměry vozidel, ale také v současné době mají vozidla vyspělejší geometrii jízdy, takže si často vystačí se skromnějšími poměry na plochy pro jízdu než jejich předchůdci.

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TP 171 VLEČNÉ KŘIVKY pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2004. Dostupné z:
http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_171.pdf
- [2] AASHTO. Guide for design of pavement structures. Washington, D.C.: 1993. 620 p. ISBN 1560510552
- [3] AASHTO Geometric Design of Highways and Streets[online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<http://design.transportation.org/Documents/TurnRadii,GreenBook2004.pdf>
- [4] Veselý, Kašpárek: Klotoida
- [5] ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic
- [6] RADIMSKÝ, M.; ČEPIL, J.; MATUSZKOVÁ, R.; BUDÍK, O.; HEINRICH, J.; SMĚLÝ, M.; KOSŇOVSKÝ, M. Metodika pro rozšíření jízdních pruhů ve směrových obloucích a aplikaci vlečných křivek vozidel.
- [7] Křivda, Vladislav. Software v dopravě.: Podklady z cvičení. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2010-2011[online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
http://www.stavebniinzenyrstvi.cz/wp-content/uploads/2014/07/Software-v-doprave_final.pdf
- [8] Křivda, Vladislav. Analýza jízdy vozidel při průjezdu okružní křižovatkou s využitím software [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/krivda/di-vissim>
- [9] HOLCNER, Petr. POZEMNÍ KOMUNIKACE I. MODUL BM01-M02 SMĚROVÉ ŘEŠENÍ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ. Brno, 2005.
- [10] Autodesk Vehicle Tracking [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<https://www.autodesk.com/products/vehicle-tracking/overview>
- [11] Autodesk Vehicle Tracking [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<http://www.cadstudio.cz/prod/vehicle.asp>

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Geometrické charakteristiky směrodatných vozidel a zákonné maximální hodnoty [1]

Obrázek 2: Šablona vlečných křivek pro osobní automobil [1]

Obrázek 3: Šablona vlečných křivek pro osobní automobil [3]

Obrázek 4: Rozměry směrodatného vozidla

Obrázek 5: Porovnání přímého a odbočovacího manévru osobního vozidla v programu AutoTURN [7]

Obrázek 6: Nejpoužívanější přechodnicové křivky [6]

Obrázek 7: Graf křivosti čistě kružnicového oblouku [9]

Obrázek 8: Graf křivosti s klotoidickými přechodnicemi [9]

Obrázek 9: Klotoida [4]

Obrázek 10: Vytyčení klotoidy [4]

Obrázek 11: Hlavní vytyčovací hodnoty [9]

9. SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tabulka 1: Hlavní vytyčovací hodnoty

Tabulka 2: Hodnoty aproximace klotoidy kružnicí

Tabulka 3: Aproximace pomocí okamžitého poloměru v polovině intervalu

Tabulka 4: Lineární aproximace

Tabulka 5: Porovnání koncových hodnot klotoidy

Tabulka 6: Rozměry vozidla

Tabulka 7: Část tabulky pro výpočet aproximací vlečných křivek

Graf 1: Porovnání klotoid dle různých aproximací

Graf 2: Vykreslení vlečných křivek